

OUTILS DE GESTION DES MATIERES ORGANIQUES EN AGRICULTURE DE CONSERVATION EN TUNISIE

Patrice Autfray, P.Guillaume, F.Forest, A.Chabanne, O.Husson ¹

¹ Cirad Unité de Recherches SCV TA B-01 / 07 Avenue Agropolis 34398 Montpellier Cedex – France
(33) 4.67.61.56.43 fax : (33) 4.67.61.75.13 autfray@cirad.fr; patrice.guillaume@cirad.fr; francis.forest@cirad.fr;
andre.chabanne@cirad.fr; olivier.husson@cirad.fr

1. Présentation

L'Agriculture de Conservation (AC) en Tunisie soumise à un climat semi-aride doit pouvoir optimiser l'efficacité des ressources en eau (400 mm/an) pour sécuriser la production de céréales et de fourrages. À court terme les techniques d'AC en améliorant les propriétés physiques du sol en surface par rapport aux systèmes traditionnels (Nouiri et al., 2008), permettent une meilleure infiltration de l'eau avec des quantités de résidus limitées.

À plus long terme, l'amélioration du statut organique du sol apportée par l'intégration progressive des matières organiques stables issues des résidus de culture, pourrait également contribuer à une meilleure rétention de l'eau. Les Matières Organiques du Sol (MOS) ont la capacité de retenir jusqu'à plus de 20 fois leur poids d'eau (Smith et al., 1994). Ben-Aissa et al. (2009) ont mesuré dans le nord de la Tunisie une augmentation de 2 T/ha de C dans la couche superficielle du sol (0-10 cm) après sept années de culture en mode AC alternant une année de céréale et deux années de légumineuse.

Dans ce contexte il convient d'utiliser des outils d'aide à la conception de nouveaux systèmes permettant (i) de modéliser l'évolution des MOS sous systèmes de culture diversifiés et (ii) de rationaliser la gestion des biomasses produites, dont une partie pourrait être conservée pour le sol et une autre dédiée aux besoins de l'élevage (Benhammouda et al., 2008).

L'unité de Recherches SCV spécialisée en Agriculture de Conservation travaille avec ses partenaires dans de nombreuses zones agroécologiques à la création de systèmes de culture pratiquant le Semis-direct sur Couvertures Végétales (SCV). Pour piloter la gestion des MOS dans ces systèmes, le modèle de Hénin-Dupuis est utilisé (Hénin et Dupuis, 1945 ; Sà et al., 2004 ; Bayer et al., 2006). Il permet notamment de simuler l'évolution sur une longue période de temps des stocks de MOS en surface à partir d'un jeu de données soit théoriques issues de la littérature, soit calculées à partir de mesures sur le terrain. Des analyses biochimiques de résidus permettent d'estimer les quantités potentielles de C pouvant être stockées (ISB, Indice de Stabilité Biologique). D'autres outils fondés sur les propriétés physiques des résidus de culture servent (i) à caractériser la couverture du sol par type de résidu et en déduire un potentiel de limitation de l'évaporation, (ii) à estimer le potentiel de rétention d'eau de différents types de résidus et par suite un possible manque de ressource hydrique pour les cultures.

Cette approche de différentes fonctions des matières organiques pourrait-être développée au niveau du dispositif tunisien. Cette présentation définit les jeux de données minima nécessaires pour utiliser différents outils et une application pratique majeure, visant à gérer la nutrition azotée des cultures. Ces outils simples permettent de définir des indicateurs de suivi et de pilotage des systèmes de culture par les matières organiques. Ils compléteraient utilement les approches déterministes qui s'attachent à expliquer les mécanismes du stockage des matières organiques dans le sol.

2. Notion de niveau de seuil et de niveau optimal en matières organiques

La mise en culture conduit généralement au cours du temps à une baisse plus ou moins rapide des MOS. En zone tempérée (Loveland, 2003) comme en zone tropicale (Feller et Beare, 1997), il est généralement admis qu'en raison des nombreuses propriétés des MOS sur la fertilité des sols, qu'il existe généralement un niveau minimal pour une région donnée et pour une culture principale, un niveau de MOS à maintenir pour garantir une productivité. Ce niveau peut-être défini comme un seuil à ne pas dépasser au risque de compromettre la durabilité. De manière à limiter les risques et conserver une marge de manœuvre nous pensons définir un niveau optimal supérieur de 25% à ce seuil critique.

En zone tropicale semi-aride dominée par des sols à texture sableuse, il a été proposé de définir un seuil critique en MOS exprimé en C correspondant à une conservation minimale des propriétés d'agrégation du sol et de fourniture en nutriments, qui dépend de la texture du sol avec la relation suivante :

$$C_{\text{critique}} = (0.32 * (\% A + LF) + 0.87) / 10 \dots\dots\dots(1)$$

Avec C_{critique} = % en C sur 0-10 cm

% A = teneur en argiles

% LF = teneur en limons fins

Un exemple d'études est donné au niveau de la Figure 1 qui présente un SIG mentionnant dans un terroir donné le statut organique du sol par rapport à un seuil de MOS donné.

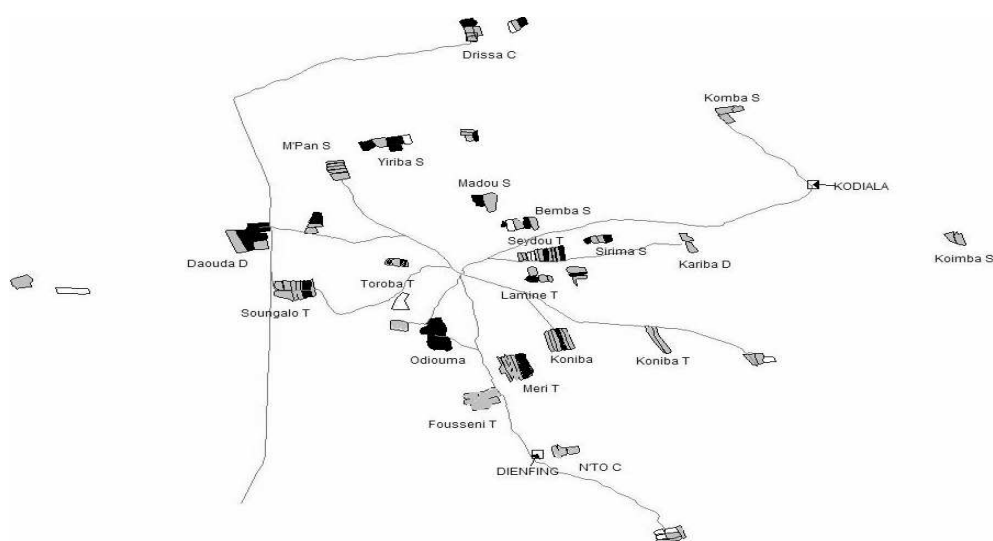


Figure 1. Cartographie dans un terroir géoréférencé du statut organique des sols des parcelles par rapport à un seuil théorique en MOS déterminé par test granulométrique (d'après Autfray et al., 2007) ; en blanc, parcelles en dessous du seuil critique ; en gris parcelles autour du seuil critique ; en noir parcelles au-dessus de 25% du seuil critique, soit un niveau optimal théorique.

Ce seuil critique peut également être obtenu grâce à un réseau de parcelles où l'on associe rendement et teneur en MOS (Figure 2).

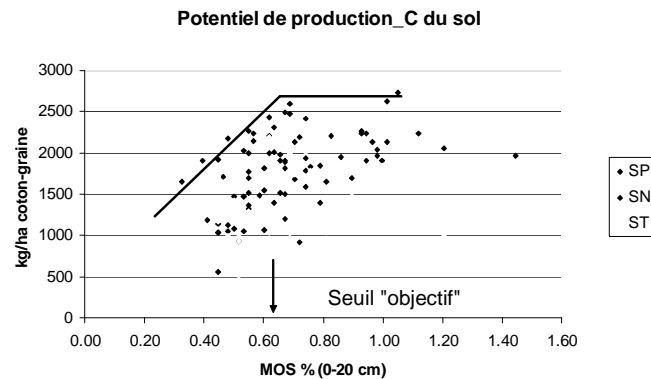


Figure 2. Relation pour une région donnée entre rendement de la culture de base et le taux en matières organiques du sol ; exemple du Nord-Cameroun et du Coton (d'après Crétenet et al., 2007).

3. Le modèle Hénin-Dupuis et la détermination des coefficients k_1 et k_2 .

3.1 L'équation du modèle Hénin-Dupuis

Le modèle monocompartimental de Hénin-Dupuis est adapté au suivi de l'évolution dans le temps des MOS à la fois en Systèmes Conventionnels. Deux formules sont utilisées, la première qui exprime la variation de stock en effectuant un bilan à l'échelle de l'année entre les apports en C organique (parties aériennes et racinaires des résidus de cultures) et les pertes du sol par minéralisation et érosion :

$$\Delta \text{ Stock C} = \text{C apports} * k_1 - \text{C sol} * k_2 \dots\dots\dots(2)$$

Avec $\Delta \text{ Stock C}$ = variation de stock en C du sol à une profondeur donnée pendant un temps donné

C apports = la quantité de C des apports au sol

k_1 = le coefficient d'humification de ces apports

C sol = la quantité de stock au départ à la même profondeur

k_2 = le coefficient de minéralisation du sol (en incluant l'érosion)

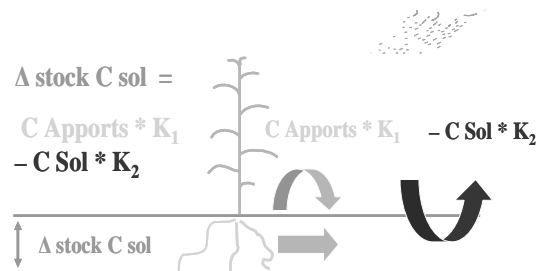


Figure 3. Le Modèle Hénin-Dupuis : la variation des stocks en MOS ou C à un temps donné est égale au bilan des pertes par minéralisation et érosion ($-C \text{ Sol} * k_2$) et des gains par les apports ($C \text{ Apports} * k_1$).

La formule de base qui définit le stock du sol à un temps t :

$$C_t = C_0 * e^{-k_2 t} + k_1/k_2 * A * (1 - e^{-k_2 t}) \dots\dots\dots(3)$$

Avec C_t = stock C à un temps t C_0 = stock de départ

k_2 = coefficient de minéralisation du sol (avec l'érosion) A = quantité C apporté

k_1 = coefficient d'humification

3.2 Estimation des pertes en C en Systèmes Conventionnels (k_2)

En systèmes conventionnels une étude synchronique sur un réseau de parcelles permet au cours du temps de modéliser les pertes, par minéralisation et érosion, en prenant comme base le taux initial en zones non-cultivées. La modélisation d'évolution du taux ou des stocks des matières organiques eu surface obéit (i) soit un modèle mono-compartimental si on ne possède pas une référence ancienne de zone totalement protégée (ii) soit un modèle à double-compartiment qui a met en évidence 2 compartiments des MOS, un labile et un résistant. On aboutit ainsi à définir 2 coefficients de minéralisation des sols, celui étant souvent le plus utilisé étant le deuxième (k_2) avec le modèle de minéralisation du sol suivant, incluant également les processus érosifs :

$$C_{\text{sol cultivé}} / C_{\text{sol non cultivé}} = C_{CR} * e^{(k_{CR} * \text{années})} + C_{CL} * e^{(k_{CL} * \text{années})} \dots\dots(4)$$

Avec $C_{\text{sol cultivé}} / C_{\text{sol non cultivé}} = \%$ de C en sol cultivé par rapport à un sol de référence non-cultivé

C_{CR} = Carbone Compartiment à temps de renouvellement Rapide

C_{CL} = Carbone Compartiment à temps de renouvellement Lent

k_{CR} = coefficient de minéralisation de C CR

k_{CL} = coefficient de minéralisation de C CL (k_{CL} = estimation du k_2)

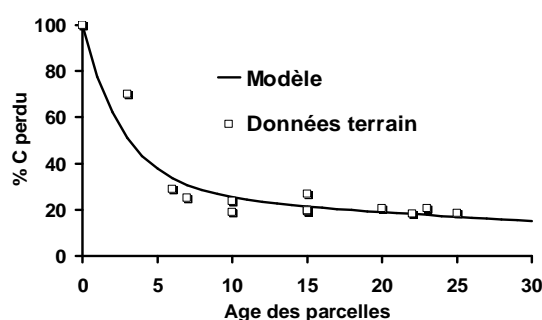


Figure 4. Exemple d'étude synchronique des stocks en C du sol à un instant t; elle permet une estimation du k_2 (cas ici avec 2 coefficients). Etude de cas en zone tropicale sèche, d'après Aufray et al., 2007.

3.3 Estimation des apports en C stable au sol par mesure de l'ISB ou k_1

Une estimation du k_1 ou coefficient d'humification des apports peut-être faite indirectement en déterminant l'ISB (Indice de Stabilité Biologique; Linères et Djakovitch, 1993) qui est une manière de caractériser le C stable de tout apport organique par analyses biochimique selon la méthode Van-Soest couramment utilisée pour les fourrages :

$$ISB = 2.122 - (0.02009 * \text{solubles}) - (0.02378 * \text{hémicellulose}) + (0.0084 * \text{lignine}) - (0.02216 * \text{cellulose}) \dots\dots\dots(5)$$

$$k_1 = \%C \text{ total} * ISB$$

Tableau 1. Indice de Stabilité Biologique (ISB) et estimation du complément N nécessaire au stockage.

Culture	Partie	Analyse fibres				ISB	% C des apports	k_1 estimé	% N des apports	MS totale (T/ha/an)	C stable (kg/ha/an)	N stable = C stable / 8 (kg/ha/an)	Bilan N organique (kg /ha/an)
		Solubles	Hémicellulose	Cellulose	Lignine								
Céréale (blé, orge, avoine)	aérienne	32	25	30	13	0.33	44	0.14	1.00	3.5	507	63	-28
	racines	17	30	35	18	0.44	44	0.19	0.50	0.5	97	12	-10
Légumineuse immature (sulla, luzerne, féverole)	aérienne	51	11	33	5	0.15	44	0.06	3.00	2.0	129	16	44
	racines	36	16	38	10	0.26	44	0.11	1.50	0.4	46	6	0
Légumineuse mature (sulla, luzerne, féverole)	aérienne	31	16	40	13	0.34	44	0.15	2.00	5.0	751	94	6
	racines	1	21	60	18	0.42	44	0.19	1.00	1.0	187	23	-13

Lors de cette analyse le rajout de la teneur en N permet d'estimer la quantité de N nécessaire pour accompagner le stockage du C :

$$N \text{ stable} = \text{quantité de C stable} / 8 \text{ (Mary et al., 1994)} \dots\dots\dots(6)$$

Un bilan N organique peut-être établi et permet d'estimer l'éventuel complément azoté à fournir en cas de bilan négatif ou au contraire à déduire en cas de bilan positif (voir chapitre suivant).

$$\text{Bilan N Organique} = (\text{MS totale} * \% \text{ N des apports}) - N \text{ stable} = \text{Complément N à fournir ou à déduire au niveau de la programmation de la fertilisation azotée du système de culture} \dots(7)$$

3.4 Modélisation d'évolution des stocks sous culture

Lors de la conception de systèmes de culture, on peut simuler dans le temps l'évolution théorique en Systèmes Conventionnels comme en Agriculture de Conservation des stocks de MOS sous culture. Un exemple est donné avec les données de départ pour 5 systèmes de cultures théoriques pouvant être appliqués dans le contexte tunisien (Figure 5).

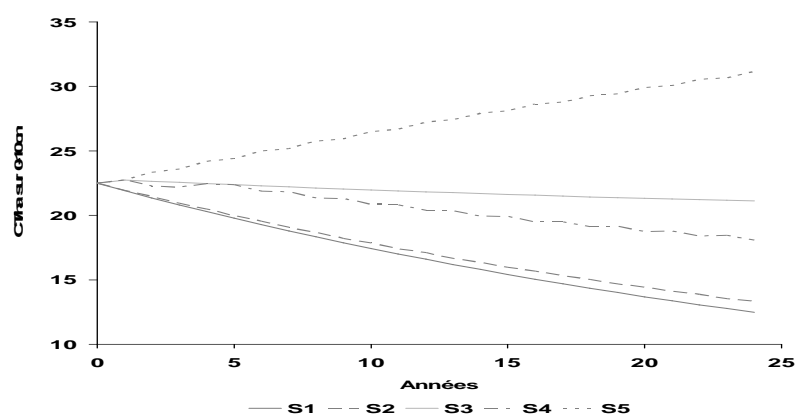


Figure 5. Modélisation d'évolution des stocks sous culture. Comparaison de 5 systèmes de culture théoriques pour la Tunisie:

- S1. Système Conventionnel monoculture céréale
 - S2. Système Conventionnel rotation céréale / légumineuse mature
 - S3. Agriculture de Conservation monoculture céréale
 - S4. Agriculture de Conservation rotation céréale / légumineuse mature exportée
 - S5. Agriculture de Conservation rotation céréale / légumineuse mature restituée
- $D_a = 1.5$
 $\%C \text{ au départ} = 1.5$
 $\text{Stock } 0-10 \text{ cm} = 22.5 \text{ T / C / ha}$
 $SC \text{ } k_2 = 3\%$ donc 1.5% d'érosion et 1.5% de minéralisation
 $CA \text{ } k_2 = 1.5\%$

Le complément N moyen (kg N/ha/an) accompagnant le stockage de C déterminé à partir du Tableau 1, sont les suivant :

- S1. 10 kg
- S2. 11.5 kg
- S3. 38 kg
- S4. 19 kg
- S5. 22.5 kg

3.5 Comparaison entre Systèmes Conventionnels et Agriculture de Conservation au bout d'un temps t

Il est possible à partir du moment où l'on possède un réseau de parcelles en SC et AC de déterminer ces propres coefficients k_1 et k_2 pourvu qu'il y ait une large gamme en AC d'apports moyens par les résidus de culture et les plantes de couverture. Une étude de cas est donnée dans la Figure 6 au bout de 13 années d'applications de 6 couples de systèmes en SC et AC. La première étape est la mesure des coefficients des droites de régression entre l'Apport moyen en C annuel et le stock mesuré au bout de 13 années, auquel on rajoute sur la figure le stock au départ avant la mise en culture.

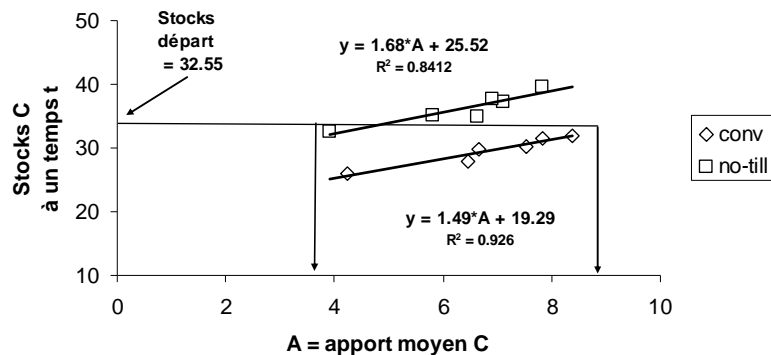


Figure 6. Détermination pour un sol sur 0-10 cm des k_1 et k_2 sur un dispositif ayant 13 années de suivi : étude cas en zone sub-tropicale humide (Brésil, 20°C, 1440 mm), d'après Bayer et al., 2006.

Les transformations mathématiques de l'équation de base (3) permettent de calculer d'abord k_2 puis k_1 avec :

$$k_2 = (\ln(\text{Stock départ}) - \ln(a)) / t \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$k_1 = (k_2 * b) / (1 - e^{-k_2 t}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

Avec $t = 13$ années

Tableau 2. Données d'entrée (stock départ, a et b) et de sortie (AC_0 , k_2 et k_1) de l'exemple donné dans la Figure 6 ; a, b et AC_0 (quantité d'apports pour avoir le stock de départ) sont déterminés graphiquement ; d'après Bayer et al., 2006.

Systèmes de culture	Stocks Départ (T/C/ha)	a	b	AC_0	k_2	k_1
SC	32.55	19.29	1.49	8.84	0.040	0.147
CA	32.55	25.52	1.68	3.92	0.019	0.146

Nous remarquons dans le Tableau 2 que le k_2 est 2 fois plus élevé en SC qu'en AC et que le k_1 est le même.

4. Outils de caractérisation du paillage

4.1 Couverture du sol ou une estimation indirecte du potentiel de limitation de l'évaporation du sol

En AC on admet généralement que la réduction potentielle de l'évaporation du sol par les résidus est linéairement corrélée avec le taux en couverture. La relation entre le taux de couverture du sol et la biomasse de résidus est connue pour différents types de résidus (Findeling, 2001). Cette relation est de la forme :

$$\text{Taux couverture} = 1 - e^{- (\text{Coef résidus} * \text{Quantité Résidus})} \dots\dots\dots(10)$$

Cette relation dépend du type de culture mais aussi de son état. On remarque que la paille de blé possède un très bon pouvoir couvrant (Figure 7).

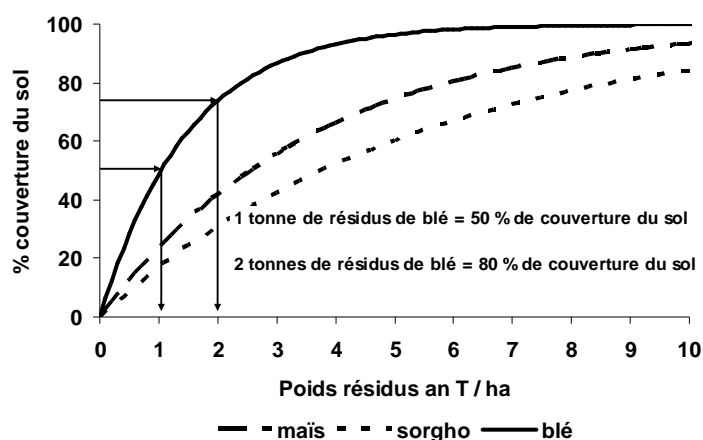


Figure 7. Estimation de la couverture du sol en fonction du type et de la quantité de biomasse.

4.2 Capacité de rétention en eau du paillis

En climat aride la végétation est censée jouer un rôle négatif dans l'interception de pluies de faibles intensités au détriment du sol. En AC des études ont montré (Findeling, 2001) :

- qu'à biomasses égales les tiges de blé interceptent mieux les pluies que celles de maïs ;
- que l'intensité des pluies n'affecte pas significativement la lame d'eau interceptée ;
- que l'âge des résidus n'a pas d'influence notable sur l'interception.

Une loi d'interception est proposée avec pour des résidus de blé une simulation du potentiel d'interception de l'eau de pluie exprimée en équivalent mm (Figure 8).

$$\text{Lame d'eau interceptée (mm)} = a_1 * Q_p + a_2 * Q_p^2 \dots\dots\dots(11)$$

Avec Q_p = biomasse de paillis en T/ha

Pour le blé $a_1 = 0.627$ et $a_2 = - 0.0373$

Nous remarquons que ce potentiel d'interception en eau de pluies par les résidus peut-être dans le contexte tunisien considéré comme négligeable étant donné les quantités modérées de biomasse présentes au niveau du sol associé à un régime de pluies sous formes d'averses de forte intensité.

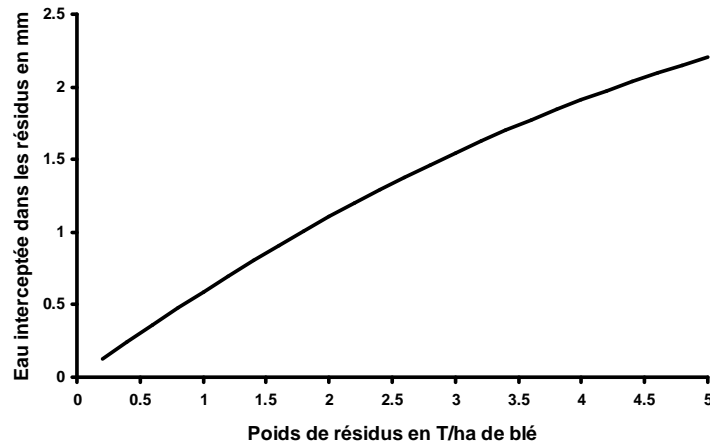


Figure 8. Potentiel d'interception d'eau de pluies par une couverture de blé en Agriculture de Conservation.

5. Conclusion

Les différents outils présentés ici permettent de :

- définir des outils d'évaluation *ex ante* de systèmes de culture en AC ;
- de piloter et d'évaluer *ext post* ces systèmes ;
- d'engager une réflexion sur un partage de la biomasse entre sol et des ressources fourragères.

Les différentes étapes suivantes pourraient être préconisées au niveau du dispositif de suivi comparatif entre SC et AC en Tunisie:

- seuil optimal en MOS à déterminer en fonction d'un niveau de teneur en argiles ;
- estimation d'un niveau moyen de minéralisation des MOS, qui déterminera également un potentiel de fourniture en N du sol ;
- définition par modélisation par système de culture de la quantité minimale de résidus de culture nécessaire au maintien d'un stock suffisant.

Le niveau de profondeur de référence peut se limiter à 0-10 cm, là où se concentre les effets entre systèmes de culture (Ben-Aïssa et al., 2009).

Egalement un compromis devra être trouvé entre maintien de ce taux optimal en MOS, la limitation de l'évaporation du sol qui nécessite un maximum de couverture et l'allocation de biomasse pour l'élevage. Les effets de perte d'eau de pluies évaporées après avoir été stockées dans le paillage, peuvent être considérés comme négligeables.

Il conviendra dans les systèmes nouveaux proposés d'introduire des légumineuses qui semblent encore plus en Agriculture de Conservation qu'en Systèmes Conventionnels la clef de la réussite de ces systèmes pour une large gamme de conditions agroclimatiques. Leur insertion permettra (i) de limiter le recours à des fertilisants azotés pour accompagner le stockage des MOS (ii) d'être une source en N facilement disponible pour les cultures. Tout récemment sous climat semi-aride en Amérique du Nord, l'introduction de cultures de légumineuses à la place de la jachère spontanée semble être dans le système *dry-farming* une véritable révolution, l'azote dans ces systèmes s'étant montré plus limitant que l'eau (250 à 350 mm/an).

6. Bibliographie

Autfray , Sissoko, Traoré, Kassambara, 2007. Référentiel sur les Matières Organiques du Sol en Systèmes Conventionnels et Semis Direct sur Couvertures Végétales en Zone Cotonnière du Mali. Poster Agroécologie et Techniques Innovantes dans les Systèmes de Production Cotonniers, Séminaire 24 – 28 / 9/ 2007, SODECOTON, Projet ESA, Maroua, Cameroun.

Bayer, Lovato, Dieckow, Zanatta, Mielniczuk, 2006. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil and Tillage Research*; 91; 217-226.

Ben-Aissa, Dimassi, Ben hadj salah, Ben-hammouda, Gallali, 2009. Effect of different residues managements on soil organic carbon and nitrogen in a semi-arid-zone. 4th World Congress on conservation agriculture, 4-7 february 2009, New-Delhi, India.

Benhammouda, Hedhbi, Abidi, Rajeh, Choubari, El-Faleh, Dichiara, 2008. Conservation agriculture based in direct-sowing. Chapter 3. The future of drylands, International Scientific conference on desertification and drylands research, Tunis, 19-21 june 2006, Springer, Netherlands, 647-657.

Crétenet, Asfom, Olina, 2007. Le statut organique des sols au Nord Cameroun ... une question préoccupante ? Poster Agroécologie et Techniques Innovantes dans les Systèmes de Production Cotonniers, Séminaire 24 – 28 / 9/ 2007, SODECOTON, Projet ESA, Maroua, Cameroun.

Feller and Beare, 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*; 79; 69-116.

Findelling, 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis-direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. Première Partie. Thèse ENGREF, Montpellier, 87 p.

Hénin et Dupuis, 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques*; 15; 17-29.

Linères et Djakovitch, 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. INRA, 15 p.

Loveland, 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*, 70, 1-18.

Mary et Guérif, 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures*; 3; 247-257.

Nouiri , Ben-Hammouda, Mhedhbi, 2008. L'agriculture de conservation. Une alternative pour améliorer l'efficience de l'utilisation de l'eau. Poster 13th IWRA, World Water Congress, 1-4 /9, Montpellier, France.

Sá, Cerri , Marisa, Piccolo, Feigl , Buckner , Fornari , Marcia , Séguy , Bouzinac , Solismar , Venzke-Filho, Paulleti, Marcos, Neto, 2004. O plantio Direto como base do sistema de

produção visando o seqüestro de carbono. Revista Plantio Direto. n.84, Novembro-Dezembro, p.45-61, 2004.

Smith, Bezdicek, Lynch, 1994. Soil organic matter dynamics and crop residue management. Dans: Soil Microbial Ecology, Metting, F.B. (Eds.), New York, 65-94.